

PROPIEDADES DE TRANSPORTE DE HORMIGONES CON ADICIONES MINERALES

TRANSPORT PROPERTIES OF CONCRETE WITH MINERAL ADMIXTURES

N.M. Alderete^{1,2}; Y.A. Villagrán Zaccardi^{1,2}; Á.A. Di Maio^{1,2}

1.-Becaria Doctoral CONICET-LEMIT, natalia-alderete@hotmail.com

2.- Investigador Asistente CONICET-LEMIT

3.- Investigador Independiente CONICET-LEMIT

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es determinar el grado de influencia que la escoria granulada de alto horno, el filler calizo y la puzolana natural tienen en ciertas propiedades de transporte del hormigón.

Las adiciones minerales cumplen actualmente un rol fundamental en la industria del hormigón, tal es así que en Argentina no se puede pensar en un cemento que no tenga al menos un 5% de adiciones. Esta situación no sólo se debe a cierto factor benéfico en el plano económico sino también debido a la mejora en propiedades del hormigón en cuanto a la durabilidad, y a su vez al aporte favorable dado por la sustentabilidad. Se debe tener presente que el empleo de adiciones minerales implica una disminución en la utilización de clínquer, cuya fabricación es responsable de la emisión de grandes cantidades de uno de los principales gases del efecto invernadero, el CO₂. El empleo de la escoria particularmente consiste en darle utilidad a un sub-producto, en este caso de la industria del hierro y del acero. En el caso de las puzolanas naturales y el filler calizo, ambos se encuentran disponibles como un recurso que sólo requiere bajo consumos de energía dado que no necesita de ningún procesamiento más que la molienda. Las propiedades de transporte del hormigón reflejan la susceptibilidad del mismo frente a agentes agresivos. El modo de ingreso de dichos agentes se evaluó mediante succión capilar, penetración de cloruros, difusión de humedad y penetración de agua a presión. Se realizaron hormigones con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento por adiciones, en algunos casos con cementos ternarios, y hormigones de control utilizando sólo cemento Portland normal, evaluando en cada caso la influencia de dichas variantes en las propiedades estudiadas.

En base a los estudios realizados se pudo determinar que las adiciones minerales tienen un notable efecto sobre las propiedades de transporte del hormigón. Estos resultados indican que es posible lograr un buen desempeño del hormigón durante su vida útil, alargando la misma y reduciendo el impacto ambiental.

Palabras clave: propiedades de transporte, adiciones minerales, sustentabilidad.

ABSTRACT

The aim of this work is to determine the influence that ground granulated blast furnace slag (GGBFS), limestone filler and natural pozzolan have on certain transport properties of concrete.

Mineral admixtures currently play a fundamental role in concrete industry, so that in Argentina all kinds of cement have at least 5% of admixtures. This situation is not only due to a beneficial economic factor but also to the improvement in concrete properties regarding durability, as well as sustainability. It must be taken into account that mineral admixtures use implies a reduction in clinker use, being clinker production the responsible of great quantities of CO₂, one of the main green-house effect gasses. Particularly, the use of GGBFS implies the use of a sub-product from iron and steel industry. In the case of natural pozzolan and limestone filler, these are available as resources that require low energy consumption because they do not need any processing other than milling.

Concrete transport properties reflect concrete susceptibility to aggressive agents. The ingress of those agents was evaluated through sorptivity, chloride penetration, moisture diffusion and water penetration resistance. Several concrete mixes with different percent of replacement were made, in some cases with ternary cement, and a control concrete mix with only Ordinary Portland cement. In each case, the influence of the replacement was evaluated through the studied properties.

Based on the results it could be determined that mineral admixtures have a large effect on concrete transport properties. These results indicate that it is possible to achieve a good concrete performance during its service life, extending it and reducing the environmental impact.

Keywords: *transport properties, mineral admixtures, sustainability.*

INTRODUCCIÓN

El empleo de adiciones minerales en el hormigón no es técnica novedosa, ya que incluso antes de la invención del cemento portland en 1842, se elaboraban morteros con cal y puzolanas. Muchas de las estructuras de la antigüedad sirven de testimonio de la durabilidad a largo plazo de dichos morteros. Aún así, el empleo de las adiciones minerales ha recorrido un largo camino hasta llegar al auge actual. Primeramente se cuestionó fuertemente su incorporación en el hormigón, estando el uso de puzolanas durante un largo tiempo mayormente restringido a Italia y Grecia, donde existen considerables cantidades de reservas de puzolanas naturales (Tierra de Santoría). En otros países, el interés en estos materiales es relativamente reciente y ha surgido debido a la escasez de recursos. La adición de escoria granulada al cemento Portland fue primeramente realizada en Alemania en 1892, pero a pesar del apoyo de Michaelis y Passow, su desarrollo industrial se mantuvo retrasado. Recién para 1984 la producción de escoria llegaba a los

15 millones de toneladas.

Actualmente, existe una fuerte tendencia a nivel internacional hacia el empleo de cada vez mayor volumen de adiciones, ya que la incorporación de las mismas en reemplazo del cemento tiene una doble ventaja: el aporte que produce en relación a la durabilidad, debido a que la incorporación de adiciones contribuye a la desconexión capilar, y la sustentabilidad que implica una disminución en el empleo de clínquer. El remedio más efectivo para reducir el impacto ambiental que produce la industria del hormigón es utilizar menos clínquer, reemplazándolo lo máximo posible con materiales cementíceos suplementarios.

La estructura de poro del hormigón de recubrimiento determina la vulnerabilidad que tendrá el hormigón ante los diversos agentes externos. El nivel de porosidad, la distribución de tamaños de poro y la conectividad son indicadores de la influencia de los agentes externos en la masa

del hormigón, por lo que están estrechamente relacionadas con la durabilidad del mismo. Estos parámetros se hallan vinculados con el grado de hidratación alcanzado por la matriz de cemento, el cual depende fundamentalmente de la razón a/c, calidad, duración y tipo de curado, proporciones de los materiales y tipo de cemento.

El transporte de agua resulta relevante porque permite describir la conectividad de poros del hormigón y porque el agua está involucrada como participante necesario en casi todos los mecanismos de deterioro del hormigón armado. En este sentido es necesario conocer el tiempo requerido para que los agentes agresivos penetren en la masa del hormigón. Existen diversos métodos basados en propiedades de transporte que permiten la imposición de variables prescriptivas y en algunos casos de variables prestacionales, con vistas a asegurar la durabilidad del hormigón armado. Resulta de sumo interés la consistencia entre los diferentes métodos de evaluación de las propiedades de transporte cuando son considerados para una aplicación en común, y también es importante referir estas comparaciones para el caso particular del hormigón elaborado con adiciones, debido a sus características de hidratación y estructura de poro particulares.

En este trabajo se presentan evaluaciones de propiedades de transporte de hormigones elaborados con adiciones y/o cementos adicionados, incluyendo filler calizo, escoria y puzolanas naturales.

EXPERIENCIAS

Materiales y Propiedades

Se elaboraron 15 hormigones diferentes: 5 con cemento portland normal (CPN) (N35-1, N35-2, N40, N45 y N50), 1 con CPN y escoria (E40), 1 con CPN y filler calizo (F40), 1 con CPN, escoria y filler calizo (EF40), 4 con cemento portland compuesto (CPC) adicionado con escoria y filler calizo (C40-1, C60-1, C40-2 y C60-2), y 3 con

cemento portland puzolánico (CPP) (P35, P40 y P60). Como agregado fino se emplearon arenas silíceas de río, una fina (ASF) y otra gruesa (ASG), y como agregado grueso piedra partida granítica (PPG) de tamaño máximo nominal (TMN) de 19mm, a excepción de los hormigones C40-2 y C60-2, que se elaboraron con PPG de TMN 25mm.

La nomenclatura numérica de los hormigones indica la relación agua/material ligante (a/mc) incrementada 100 veces. Las letras se utilizaron para representar el correspondiente tipo de material cementante (N para CPN únicamente, E para CPN+ escoria, F para CPN + filler, EF para CPN + escoria + filler, C para CPC, y P para CPP). Se moldearon probetas que fueron desmoldadas a las 24hs de su llenado y curadas normalizadamente en cámara húmeda durante 28 días de acuerdo a la Norma IRAM 1534 [4]. Transcurrido dicho lapso de tiempo, se procedió a la realización de distintos ensayos de laboratorio.

En la Tabla 1 se informan las proporciones de los materiales correspondientes a los diferentes hormigones estudiados.

En estado fresco, se evaluaron el asentamiento (presentando niveles de consistencia entre plástica y seca), el peso unitario, el contenido de aire naturalmente incorporado y la exudación, mientras que para caracterizar el comportamiento de los hormigones desde el punto de vista durable, en estado endurecido se determinaron experimentalmente los parámetros relacionados con la estructura porosa del hormigón.

Desarrollo Experimental

El desarrollo experimental de los hormigones en estado endurecido consistió en la realización de los ensayos de penetración de agua presión, succión capilar, ingreso de cloruros, permeabilidad al aire y difusión de humedad. A continuación se detallan los procedimientos y resultados obtenidos de cada uno de ellos.

Tabla 1. Proporciones y propiedades de los hormigones estudiados.

Materiales (kg/m ³)	N35-1	N35-2	N40	N45	N50	E40	F40	EF40	C40-1	C60-1	C40-2	C60-2	P35	P40	P60
Agua	140	133	140	144	150	140	140	140	166	168	168	168	140	182	170
CPN1	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CPN2	-	380	350	320	300	227	262	227	-	-	-	-	-	-	-
CPP1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	400	-	-
CPP2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	442	290
CPC	-	-	-	-	-	-	-	-	425	277	425	280	-	-	-
Escoria	-	-	-	-	-	123	-	88	-	-	-	-	-	-	-
Filler calcáreo	-	-	-	-	-	-	88	35	-	-	-	-	-	-	-
ASF	188	189	190	193	193	190	190	190	157	183	162	186	182	-	-
ASG	739	749	754	766	767	755	755	755	624	733	642	741	713	800	929
PPG 6-20	979	980	980	980	980	980	980	980	1000	1000	-	-	979	981	992
PPG 10-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1000	1000	-	-	-
Reductor de agua (l)	3,4	6,2	5,9	6	3,6	4,9	4,2	4,1	-	-	-	-	4,7	-	-
Aire incorporado (%)	4,2	3,0	3,1	3	3,1	3,2	3,5	3,4	2,3	3,0	2,6	3,3	3,2	1,7	1,9
Propiedades															
Peso unitario (kg/m ³)	2392	2404	2417	2392	2404	2392	2354	2385	2444	2394	2430	2352	2417	2404	2379
Asentamiento (cm)	11	8	10	6	6	10	9	7	8,5	5,5	9	5,5	15	4,5	5
Exudación (%)	<0,01	<0,01	<0,01	3,03	0,4	<0,01	<0,01	<0,01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	<0,01	n.d.	n.d.
Absorción 24h (%)	2,5	3,4	3,6	3,8	3,8	4,6	3,8	4,6	3,6	5	4,1	6,1	2,8	5	5,2
Porosidad (%)	6,0	8,0	8,7	8,9	8,9	10,6	8,8	10,5	9,0	11,3	9,5	10,4	6,8	11,5	11,8
f _c 28d (Mpa)	44,4	60,2	53,8	45,6	46,2	52,6	42,2	51,1	38,8	25,5	38,8	23,8	41,8	31,5	23,0

Penetración de agua a presión y succión capilar

Las estructuras cuya función específica es la contención de líquidos se encuentran sometidas a presión hidrostática, y su permeabilidad definirá su aptitud en servicio. Una metodología empleada para calificar esta propiedad la constituye el ensayo de penetración de agua a presión IRAM 1554 [5], mediante el cual se obtiene una caracterización de la calidad del hormigón en lo que respecta a su estructura porosa. La técnica consiste en someter a la probeta a una serie de escalones de

presión variables durante un intervalo de tiempo normalizado en un permeámetro (Figura 1). La presión de agua aplicada sobre la muestra varía de 1 kg/cm², al inicio del ensayo, hasta 7 kg/cm² a su finalización. Luego, la muestra es sometida al ensayo de tracción por compresión transversal localizada, obteniéndose dos partes iguales, finalmente se mide la profundidad del perfil de agua penetrado en la misma.

Para evaluar a los hormigones C_{xx} y P_{xx} se utilizaron muestras prismáticas de 200mmx200mmx100mm,

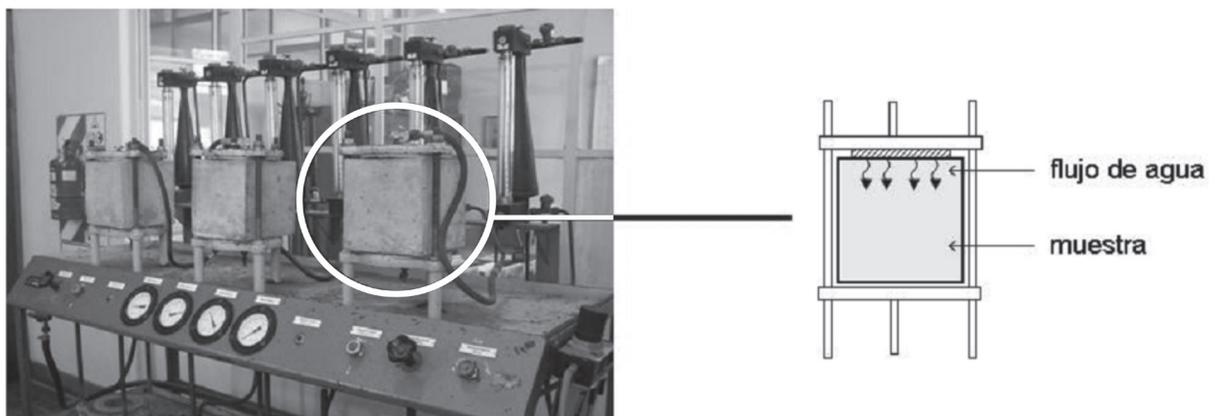


Figura 1. Permeámetro empleado en el ensayo de penetración de agua y esquema de ensayo.

siendo la cara de ensayo la correspondiente al moldeo (200mmx200mm) y estando el sector bajo ensayo delimitado por un círculo (aro de goma) de 100mm de diámetro circunscrito a dicha cara. Los hormigones Nxx, E40, F40 y EF40 fueron evaluados mediante muestras cilíndricas de 150mmx300mm, ensayándose también la cara de moldeo.

Este ensayo, permite evaluar la permeabilidad del hormigón, en relación con su estructura porosa y nivel de hidratación alcanzado. Según lo establecido en el Reglamento CIRSOC 201 [6], las penetraciones medias y máximas deberán ser inferiores a 30mm y 50mm respectivamente, cuando el hormigón se utilice para ejecutar una estructura de contención de agua.

En las estructuras de hormigón que se encuentran sometidas a ciclos de humedecimiento y secado, penetra agua a través de la estructura porosa del hormigón inducida por la tensión superficial actuando sobre los capilares del hormigón. Este mecanismo se denomina succión capilar y una forma de evaluar su efecto lo constituye el ensayo de succión capilar IRAM 1871 [7], a través del cual se obtiene un parámetro representativo de la estructura porosa del hormigón y de su respuesta al ingreso de los agentes agresivos desde el exterior.

Para llevar a cabo el ensayo se moldearon probetas cilíndricas de 100mm de diámetro por 200mm de

altura de las que se extrajo una muestra de 50mm de espesor por cada probeta ubicada próxima al sector inferior según se indica en el esquema de la Figura 2. La superficie de ensayo es la cara a 30mm desde la base de las probetas.

El ensayo consiste en registrar, en función del tiempo, la ganancia de masa que experimentan muestras de hormigón cuando las mismas se encuentran con una cara en contacto con agua. La succión capilar se cuantifica mediante la velocidad y la capacidad de succión capilar, la primera representa la velocidad de penetración por capilaridad y se expresa en $\text{g/m}^2 \cdot \text{seg}^{1/2}$, mientras que la segunda, la cantidad de agua requerida para producir la saturación capilar del hormigón con unidades en g/m^2 .

En la Tabla 2 se presentan los valores de capacidad y velocidad de succión capilar obtenidos en los diferentes hormigones estudiados. Cada valor informado corresponde al promedio de 5 determinaciones.

Penetración de cloruros

Con los hormigones Cxx se confeccionaron probetas para realizar mediciones de perfiles de ingreso de cloruros en atmósfera marina (a aproximadamente 15 metros de la línea de costa y 5 metros de altura, en la ciudad de Mar del Plata, Argentina). Se elaboraron probetas prismáticas

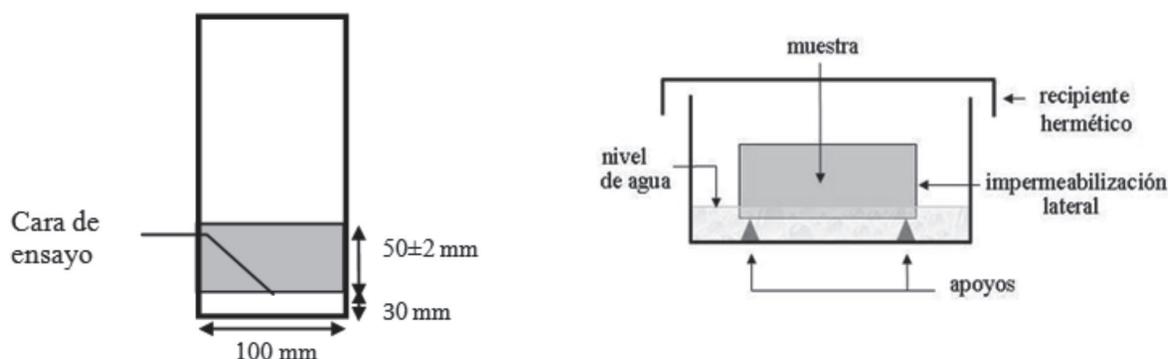


Figura 2. Esquema del ensayo de succión capilar y de la ubicación de la muestra.

Tabla 2. Resultados de succión capilar y penetración de agua a presión.

Hormigón	N35-1	N35-2	N40	N45	N50	E40	F40	EF40	C40-1	C60-1	C40-2	C60-2	P35	P40	P60
Succión capilar															
Velocidad (g/m ² .s ^{1/2})	1,31	1,44	1,68	2,42	2,88	0,88	0,91	1,48	3,64	10,92	5,89	15,37	1,68	1,60	2,90
Capacidad (g/m ²)	820	818	1125	1975	2119	552	1021	553	2738	4569	3428	4138	908	1337	2379
Penetración de agua a presión															
Media (mm)	n.d.	19	22	103	39	23	30	31	10	34	9	29	n.d.	23	47
Máxima (mm)	n.d.	41	48	151	56	41	46	55	16	38	13	32	n.d.	48	58

impermeabilizadas en todas sus caras a excepción de la cara de moldeo. Para la evaluación se determinaron por análisis químicos los perfiles de ingreso de cloruro, tomando muestras a distintas profundidades desde la superficie expuesta. Los análisis correspondieron a los contenidos de cloruros solubles en agua, valorados mediante titulación colorimétrica con nitrato de plata por el método de Mohr.

En la Figura 3 se muestran las evoluciones en el tiempo de las profundidades alcanzadas por las concentraciones de cloruros solubles en agua, para cada hormigón estudiado.

Por otro lado, en los hormigones Pxx se evaluó la migración de cloruros, empleando un procedimiento que determina la resistencia del hormigón a la penetración de cloruro cuando es sometido a un gradiente de potencial eléctrico. El proceso se desarrolla en estado no estacionario, y se encuentra normalizado según [8].

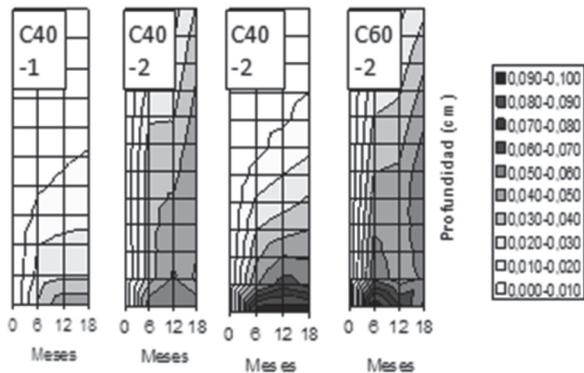


Figura 3. Perfiles de ingreso de cloruros solubles en agua en atmósfera marina natural.

La técnica consiste en aplicar en forma axial un campo eléctrico a una rodaja cilíndrica de hormigón saturado, de 100 mm de diámetro por 50 mm de espesor (Figura 4). Luego de un período bajo la aplicación de un determinado voltaje (ambos dependen de la conductividad del hormigón), la muestra es partida y rociada con solución de nitrato de plata 0,1M. La profundidad de penetración de cloruro puede medirse a partir del frente visible debido a la precipitación de cloruro de plata (Figura 4). Esta profundidad, junto con los parámetros de ensayo, permite el cálculo del coeficiente de migración de cloruro.

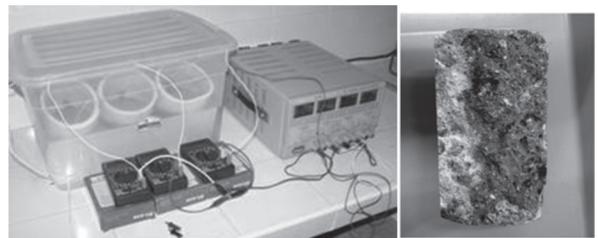


Figura 4. Equipamiento de ensayo de migración de cloruro y perfil de penetración.

En la Figura 5 se muestran los perfiles de penetración de cloruro obtenidos al aplicar un potencial de 40V. Pueden verse los perfiles para cada muestra ensayada, que permite apreciar una dispersión de resultados baja.

Permeabilidad al aire

La permeabilidad al aire es otro parámetro relacionado con la durabilidad. En este caso la evaluación se llevó a cabo con un equipo comercial (POROSCOPE modelo P 6000) (Figura 6), cuyo funcionamiento se basa en el método de Figg [9].

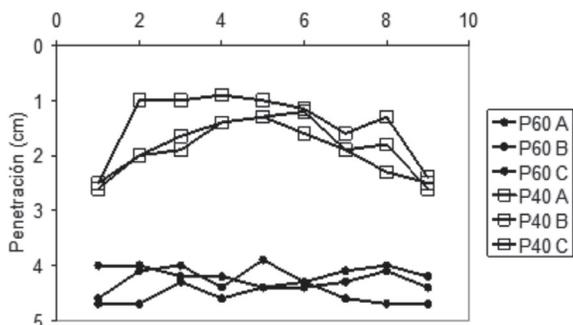


Figura 5. Resultados de migración de cloruro.

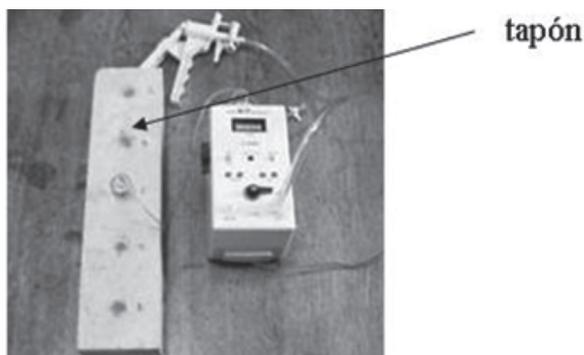


Figura 6. Permeámetro de aire.

El método empleado consiste en conformar una celda de ensayo, alcanzar una determinada presión de aire en la cámara y evaluar el tiempo en que la presión varía un cierto valor. A este valor, expresado en segundos, se lo vincula con la permeabilidad al aire del material. La cámara se realiza desde la superficie del hormigón endurecido. Para ello se efectúa, mediante una mecha, un orificio de 10 mm de diámetro y 40 mm de profundidad, luego se introduce un tapón de goma, desde la superficie hasta una profundidad de 20mm, con el fin de asegurar un correcto sellado, quedando de esta forma conformada la cámara de 10 mm de diámetro por 20mm de profundidad.

Para la realización de este ensayo se moldearon probetas prismáticas de 70x100x430 mm sobre las cuales se conformaron 5 celdas de ensayo. Los promedios de las lecturas realizadas en cada celda fueron de 107 y 87 segundos para los hormigones P40 y P60, respectivamente.

Difusión de humedad

Para la determinación de la velocidad de flujo de humedad en las muestras de hormigón se utilizó el método de la copa (Figura 7). Se evaluaron los hormigones Nxx, E40, F40 y EF40.

La humedad relativa implica una variable que afecta en forma amplia a la difusividad de vapor de agua [10], por lo que el análisis con diferentes gradientes de humedad aporta información sobre la relación entre la estructura de poros del hormigón. La metodología utilizada está diseñada para determinar difusividades en régimen estacionario, lo que implica posibles efectos de histéresis en el contenido de humedad de las muestras. Esto puede merecer estudios experimentales más extensos, pero se considera suficiente para el objetivo de este trabajo.



Figura 7. Determinaciones de difusión de humedad.

Se prepararon las copas, consistiendo en vasos plásticos conteniendo la sal higroscópica, e interponiendo en la boca de la copa la muestra de hormigón de aproximadamente 5 mm de espesor, herméticamente sellada en la junta. Las copas fueron estacionadas en cámara húmeda ($HR > 95\%$, $23 \pm 2^\circ\text{C}$), protegidas del humedecimiento por contacto directo; de esta forma los gradientes de humedad fueron en cada caso los correspondientes a las diferencias entre humedades relativas de $75,4 \pm 0,1\%$ (equilibrio con solución saturada de NaCl) y de $11,3 \pm 0,3\%$ (equilibrio con solución saturada de LiCl), y 95% como humedad externa. Se registraron los incrementos de peso de las copas en intervalos regulares de tiempo. Las determinaciones se realizaron para 5 muestras por cada serie estudiada.

En las Figuras 8 y 9 se muestran los resultados para humedad relativa interna de 11% (NaLi) y 75% (NaCl), respectivamente. Los incrementos de peso (masa de vapor difundida al interior de la copa) muestran una evolución lineal con el transcurso del tiempo a partir de las 100h de ensayo. Los datos iniciales corresponden al régimen transitorio de difusión, tiempo requerido para que evolucione la humedad en el interior de la muestra hasta que el perfil de humedad sea el correspondiente a régimen estacionario. A partir de este punto, la cantidad de masa de vapor de agua que ingresa por la cara superior de la muestra es la misma que la cantidad de masa que egresa por la cara inferior al interior de la copa. El régimen no estacionario presenta un período más prolongado cuando la humedad interna es más cercana a la externa, debido a que el gradiente de concentraciones de vapor es menor.

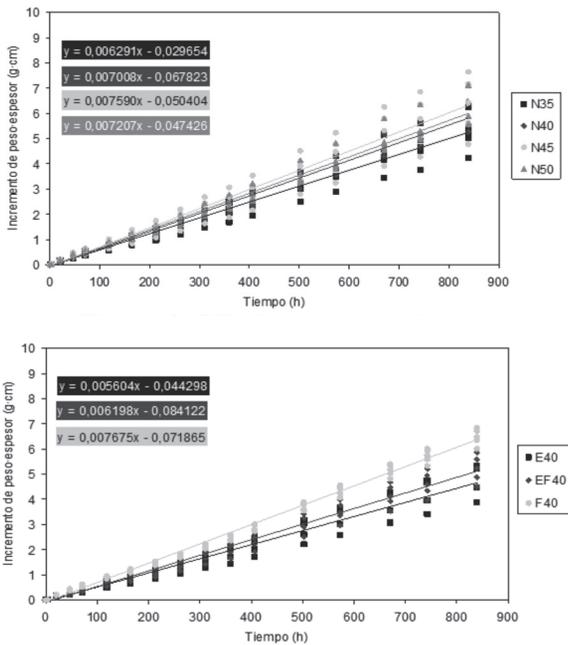


Figura 8. Difusión de vapor de agua en hormigones Nxx y E40, EF40 y F40, HR interna = 11%.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Porosidad y difusión de humedad

Si bien los valores de porosidad determinados a

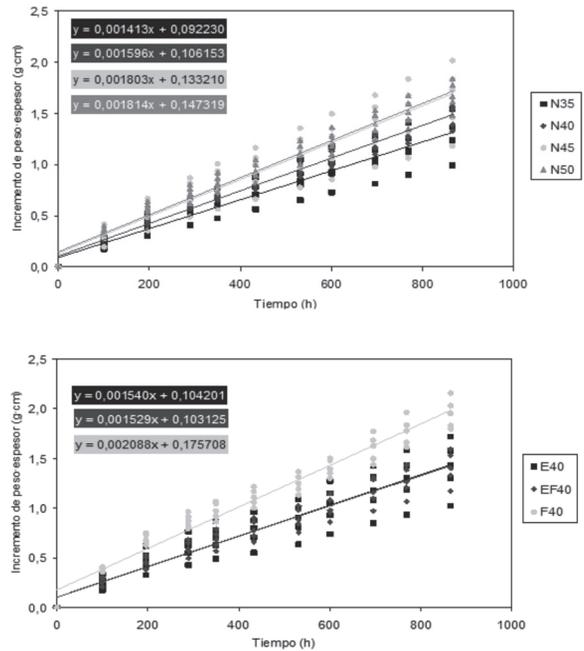


Figura 9. Difusión de vapor de agua en hormigones Nxx y E40, EF40 y F40, HR interna = 75%.

partir de la absorción de agua dan una idea del volumen de poro del hormigón, ésta propiedad no permite hacer inferencias confiables sobre la durabilidad potencial del hormigón. Entre los hormigones estudiados, se evidencian los hormigones E40 y EF40, que superan a las porosidades de otros hormigones con mayor relación a/mc, pero aún así, esta relación no se mantiene en las propiedades de transporte estudiadas.

En relación a la difusión de humedad se observa para todos los hormigones una clara disminución de la pendiente de la recta conforme disminuye la relación a/mc. Asimismo, se manifiesta una incidencia levemente perjudicial con la utilización de escoria y algo más notoria con la incorporación de filler calizo.

Penetración de agua a presión y succión capilar

La principal incidencia sobre la penetración de agua a presión resulta ser la de la relación a/mc.

Primeramente, en los hormigones Nxx puede verificarse esta incidencia, con la salvedad de N45, en el que la gran exudación contribuyó a incrementar notablemente su penetrabilidad.

En los resultados de los hormigones N35-2, N40, E40, C40-1, C40-2 y P40 puede observarse que cumplen holgadamente con los límites propuestos por el [6] por dos cuestiones fundamentales, por un lado el hecho de presentar una razón a/mc lo suficientemente baja y por el otro, que el curado normalizado garantiza las condiciones óptimas del desarrollo de los productos de hidratación. Bajo estas condiciones, prácticamente la totalidad de los canales capilares son obstruidos durante la hidratación.

En cuanto a las muestras de N50, E40, EF40, C60-1 y C60-2 tuvieron un comportamiento regular. Una razón a/mc tan elevada implica el empleo de una excesiva cantidad de agua de mezclado mayor que la necesaria para completar las reacciones de hidratación, el excedente resulta en un elevado número de capilares imposibles de llenar en su totalidad por los productos de hidratación. En el caso del hormigón P60 no cumple con los límites debido a la alta porosidad de la matriz en relación con la razón a/c respectiva. Sin embargo, es de destacar que las evaluaciones fueron efectuadas a los 28 días, por lo que, considerando que para aprovechar todo el potencial de hidratación del cemento CPP, se requeriría un mayor tiempo de curado y por lo tanto es esperable que evaluaciones efectuadas a edades mayores evidencien mejor comportamiento.

La incidencia del tipo de material cementante sobre la penetración de agua a presión no resulta notable. Esto se atribuye a que este mecanismo de transporte involucra la participación de todas las fracciones de tamaño de poro, incluyendo a los macroporos que no se saturan por capilaridad o absorción de agua. En ésta fracción de poros de gran tamaño, la acción hidráulica y/o puzolánica de las adiciones minerales no tiene gran incidencia respecto a la conductividad hidráulica del hormigón.

En los ensayos de succión capilar se manifiesta de manera muy evidente la dependencia de dicho parámetro con la razón a/mc. Pero también el tipo de material cementante contribuye ampliamente a la reducción de la capilaridad. En los hormigones N35-1, N35-2, N40, N45, N50, E40, F40, EF40, C40-1, C40-2, P35, P40 y P60 se destaca que a la edad de 28 días, todos cumplen con el límite máximo de velocidad de succión capilar de $4\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ establecido en el Reglamento [6]. Los hormigones C60-1 y C60-2 resultaron los únicos que tuvieron un mal desempeño, esto puede atribuirse al efecto compuesto del elevado porcentaje de adiciones que contiene el cemento portland compuesto y la alta relación a/mc.

El uso de la escoria muestra una notable capacidad para reducir la capilaridad del hormigón (E40 y EF40 versus N40), que es menos notable para hormigones de igual relación a/mc que incorporaron filler calizo o puzolana (F40 y P40). Aún así, para mayores relaciones a/mc, la puzolana sí demuestra beneficios apreciables (P60).

La incidencia de la escoria posiblemente se deba a su acción dual hidráulica y puzolánica, que implica beneficios a edades más cortas que la puzolana. Sin embargo, los hormigones Cxx muestran un comportamiento más influido por la adición de filler que de escoria en el CPC, por lo que su capilaridad se vio incrementada respecto a hormigones con igual relación a/mc y CPN.

Ingreso de cloruros

Es clara la diferenciación entre los hormigones C40-1 y C40-2, con los C60-1 y C60-2. Los primeros tienen una relación a/mc más baja que los segundos, por lo que resulta lógica esta distinción. En los hormigones C40-2 y C60-2, que presentan un mayor tamaño máximo de agregado, y por lo tanto un mayor espesor de interfase, la velocidad de ingreso resulta algo mayor respecto a los hormigones C40-1 y C60-1, en los que la interfase tiene menor peso relativo. Esto es consecuente con la mayor porosidad que en general presenta la

interfase respecto a la matriz y los agregados.

De acuerdo a los resultados de migración de cloruros mostrados en la Figura 7, el perfil registrado por el hormigón P60 es marcadamente mayor que el perfil del hormigón P40. La diferenciación de acuerdo a la relación a/c de cada hormigón resulta significativa y acorde a las porosidades de cada uno.

En la penetración de cloruro, los hormigones Pxx mostraron resultados más favorables que los Cxx, sobre todo considerando que la escoria incluida en el CPC le conferiría mayor capacidad de retención de cloruro, pero cuyo impacto resulta minorado debido a la inclusión paralela de filler calizo e implica, entonces, menor incidencia que la desconexión capilar obtenida en los hormigones con CPP.

Permeabilidad al aire

Para los hormigones P40 y P60 se observa que al aumentar la razón a/mc se reduce el tiempo de ensayo. Un menor tiempo indica que el aire fluye más rápidamente por la estructura porosa del hormigón de recubrimiento, por resultar más abierta y presentar un mayor nivel de conectividad entre poros. En función del rango tentativo recomendado, la calidad del hormigón de recubrimiento resulta “adecuada” en el caso del hormigón P40 y “no muy buena” en el caso del P60. Por otro lado, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las propiedades anteriormente evaluadas, es esperable que a edades mayores la acción puzolánica aumente la tortuosidad y desconexión de poros, mejorando el comportamiento durable de los hormigones.

CONCLUSIONES

Se han presentado valoraciones de las propiedades de transporte de hormigones elaborados con diferentes tipos y contenidos de adiciones minerales en reemplazo del cemento. Se observa

la fuerte influencia de la relación a/mc en todos los ensayos realizados, evidenciando su estrecha relación con la estructura de poros y por lo tanto con la susceptibilidad frente al ingreso de sustancias agresivas. Los resultados demuestran la potencialidad del uso de las adiciones en ambientes agresivos. También es de destacar que todas las evaluaciones fueron efectuadas a los 28 días, siendo esperable que a edades mayores se obtengan mejores resultados desde el punto de vista durable, siempre y cuando se garanticen adecuadas condiciones de curado.

Respecto a la penetración de agua a presión, la incidencia de las adiciones es pequeña en hormigones jóvenes. Es esperable un mayor impacto de las mismas con el transcurso del tiempo, pero debe tenerse en cuenta la limitada acción que pueden demostrar en la reducción de la conectividad de macroporos, que participan con gran incidencia en este fenómeno de transporte.

En cuanto a la capilaridad, la escoria mostró los mayores beneficios en comparación con el filler calizo y la puzolana. Esto es atribuible a la acción también hidráulica de la escoria que supone una ventaja respecto al filler y la puzolana, que tienen acciones únicamente física y puzolánica, respectivamente.

Finalmente, en la penetración de cloruro, la puzolana se mostró más eficaz, superando mediante la disminución de la conexión capilar a la mayor capacidad de retención que pudiera aportarle la escoria al CPC y que se ve limitada por la acción dilutiva del filler calizo también incorporado. El CPC, como cemento adicionado, no implica necesariamente mejoras en cuanto a otras propiedades de transporte del hormigón cuando se lo compara con el CPN. Esto surgirá del balance de efectos benéficos por hidráulica y puzolanicidad contra los efectos dilutivos asociados principalmente al filler calizo y su proporción en el cemento.

REFERENCIAS

- 1.- Bažant Z.P., Najjar L.J. (1972), “Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete”.Materials and Structures, Vol.5, N°25, pp. 3-20.
- 2.- CIRSOC 201. (2005). “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón”. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles. Buenos Aires, Argentina.
- 3.- Farzadnia, N. ; et al. (2011). “Incorporation of Mineral Admixtures in Sustainable High Performance Concrete”. International Journal of Sustainable Construction, Engineering & Technology. Vol 2, Issue 1, June.
- 4.- Figg, J. W. (1973). “Methods of Measuring the Air and Water Permeability of Concrete” Mag. Concr. Res., 25 (85), pp. 213-219.
- 5.- IRAM 1534. (2004). “Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral”. IRAM. Buenos Aires, Argentina.
- 6.- IRAM 1554. (1983). “Hormigón de cemento pórtland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido”. IRAM. Buenos Aires, Argentina.
- 7.- IRAM 1871. (2004). “Método para la determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido”. IRAM. Buenos Aires, Argentina.
- 8.- Mehta P. K. (1986). “Concrete: structure, properties and materials” Prentice Hall, New Jersey. Estados Unidos.
- 9.- Moranville-Regourd M. (2003). “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete - Chapter 13: Calcium Aluminate Cements”. Ed.: Peter C. Hewlett.
- 10.- NT Build 492. (1999). “Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments”.Nordest. Espoo, Finlandia.